

BLEビーコンを用いたグローバルマップマッチングによる経路推定法

山本 大介¹ 田中 亮佑¹ 梶岡 慎輔¹ 松尾 啓志¹ 高橋 直久¹

概要: 近年, BLE(Bluetooth Low Energy) ビーコンを用いた位置推定サービスが普及しつつある. また, 位置推定結果からユーザの移動経路を推定し, 可視化や分析を行うサービスもある. 従来の BLE ビーコンに基づく経路推定手法は, BLE の電波強度から位置推定を行ったあとに, 位置推定結果の系列から経路推定を行う手法が一般的である. そのため, 推定を二回繰り返すことになり, 精度悪化の原因の一つとなり得た. そこで本論文では, ビーコンを用いたユーザの経路・滞在推定手法として, GPS を用いた経路推定で利用されるグローバルマップマッチングの手法を BLE ビーコンに適用し, BLE ビーコンの電波強度から, 直接, 大域的に経路・滞在推定を実現する手法を提案する.

Path Estimation Method using Global Map Matching using BLE Beacons

DAISUKE YAMAMOTO¹ RYOSUKE TANAKA¹ SHINSUKE KAJIOKA¹ HIROSHI MATSUO¹
NAOHISA TAKAHASHI¹

1. はじめに

近年, BLE(Bluetooth Low Energy) 機能を搭載したスマートフォンやビーコン機器の普及が進んでいる. それに伴い, BLE ビーコン (以下, ビーコン) を用いたサービスや, ユーザの移動を追跡し行動の可視化や分析を行うサービスが多数提案されている. 我々も, 名古屋工業大学内に約 1600 台のビーコンを設置し, ビーコンを用いて授業の出欠が可能な出欠管理システム「Nitech ピロリン」[6]を開発してきた.

一方で, ビーコンを用いた経路推定手法には, 設置間隔が荒いときに精度が低くなる問題 [4][5]がある. GPS を用いた経路推定でも同様に, GPS の受信間隔が荒いときに精度が低くなる傾向があるが, グローバルマップマッチング [1][2][3] などの改善手法が提案されてきた. ビーコンに対しても同様にグローバルマップマッチングが適用できるかもしれないが, ビーコンと GPS は原理が異なるため, そのままでは適用できなかった.

そこで, 本研究の目的は, ビーコンを用いた経路推定にグローバルマップマッチングを適用することにより, ユーザの移動に関する高精度な経路・滞在推定を実現することである. 本研究における経路推定とは, ノードとリンクから構成される経路ネットワーク上の移動系列を推定する. 滞在推定とは, その場所に滞在していた時間 (開始時間と終了時間) の推定を行なうことである.

本研究の特徴は, 局所的な位置推定結果の系列を経路とする [9][10] のではなく, GPS で用いられているグローバルマップマッチング (本研究では ST-Matching [2] を参考) を改良することにより, 大域的に最適な経路・滞在推定を実現することである.

本手法を実現する上で, 以下の課題が挙げられる.

課題 1 ビーコンの設置個所の制約のため, 必ずしも経路ネットワーク上にビーコンを設置できるとは限らない. たとえば, 図 1 の例のように, ビーコンの設置位置と経路ネットワーク上のノードの位置は離れていることがある. また, ビーコンの冗長性を持たせるため, 近い場所にビーコンが複数設置されている場合もある.

課題 2 ビーコンは建物の壁や床などによって電波の反射

¹ 国立大学法人 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology

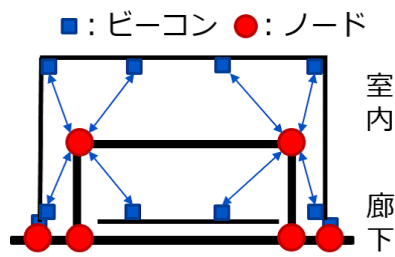


図 1 ビーコン設置位置と経路ネットワークのノード位置が一致しない例

が発生するマルチパスの問題があるため、ビーコンからの距離が離れるほど RSSI の値は極端に不安定になりやすい。

課題 3 ビーコンと GPS は原理が大きく異なるため、GPS 向けのグローバルマップマッチングの手法をそのままビーコンに適用することが出来ない。

これらの問題に対して、以下のアプローチで解決を試みる。

アプローチ 1 ビーコンの実際の設置関係を表すビーコンネットワークと、ユーザーが移動する経路を表す経路ネットワークの 2 つを構築する。ビーコンネットワーク上でのマップマッチングの結果を経路ネットワークに変換することで、両者を分離し、ビーコンの設置個所の問題を解決する。

アプローチ 2 連続するビーコンデータの系列を 1 つに統合することで、安定したビーコンデータの取得を可能にする。また、信頼性の低いビーコンを検出しないために、しきい値によるフィルタリングを行なう。

アプローチ 3 ST-Matching をビーコン向けに改良した BST-Matching を提案することにより、ビーコン向けのグローバルマップマッチングを実現する。

2. 関連研究

GPS の系列から経路推定を行う手法として、逐次的マップマッチング [1] とグローバルマップマッチング [2][3] が提案されている。グローバルマップマッチングとは、全ての GPS 測位点系列を入力してから、全体最適な経路を求める手法である。Lou ら [2] は GPS の受信間隔が荒い場合においても高い精度でマッチングを行える ST-Matching を提案している。空間的特徴と時間的特徴を考慮しており、各候補点間のスコアを基にピタビアルゴリズムを用いて経路を導出している。White ら [3] は curve-to-curve matching という手法を用いている。

また、ビーコンを用いたユーザーの位置推定の研究として、近接性方式 [4][5] や、三点測量方式 [7]、環境分析方式 [6] がある。近接性方式とは複数のビーコンの電波を受信した際に、RSSI が最も高いビーコンがある場所を推定位置とする方式である。ビーコンの設置個数が少ない環境におい

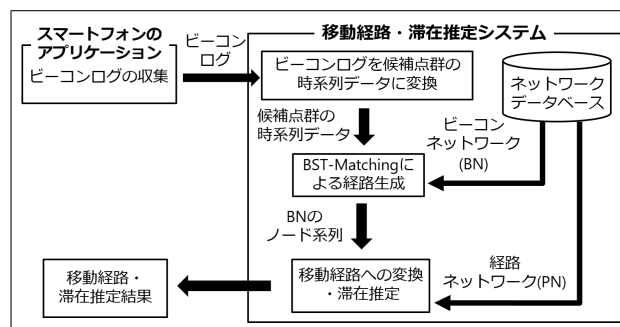


図 2 提案手法の構成図

ては精度が低いことが指摘されている [4][5]。酒井ら [7] は複数のビーコンと三点測量法により、ユーザーの位置推定を行なっている。三点測量方式とは 3 個の発信機の電波を観測することで、ユーザーの位置を特定する方式である。梶岡ら [6] は環境分析方式により位置推定を行なっている。環境分析方式とは事前に位置推定を行なう地点ごとに計測したビーコンの ID や RSSI を基に推定モデルを構築し、位置推定を行なう際に観測したビーコンの ID や RSSI と推定モデルから位置推定する方式である。

また、ビーコンを用いたユーザーの経路推定に関する研究 [9][10] もある。岡田ら [9] は、ユーザーの行動分析のために、GPS とビーコンを用いた屋内外位置推定を行なっている。位置推定の結果からナビゲーション用の歩行空間ネットワーク上の地点を決定する。駒井ら [10] は、病院や老人ホームにおける介護対象者を見守るシステムとして、被監視者に負担をかけることなく居場所を推定する。

3. 提案手法

提案手法の構成図を図 2 に示す。提案手法では、事前に、ビーコン設置環境に関するビーコンネットワーク、経路ネットワークを構築する。そして、ユーザーが持つスマートフォンによって収集されたビーコンログとこれらのネットワークに基づいて経路・滞在推定を行なう。経路の推定は、ビーコンネットワークとビーコンログを入力として、本研究で提案する BST-Matching によって推定する。その後、ビーコンネットワーク上のノード系列を、経路ネットワーク上のノード系列に変換したものをユーザーの経路と推定する。また、推定された経路とビーコンログに記録された時間を基に滞在推定も可能である。

3.1 ネットワークの構築

本研究では、ビーコンネットワークと経路ネットワークの 2 つを構成する。ビーコンネットワークはビーコンの配置関係に基づいて作成したグラフであり、経路ネットワークは出力となる経路を定義するためのネットワークである。ビーコンネットワークを構築する理由は、後述する BST-Matching を高精度に実現するためである。

表 1 PN ノードテーブル

カラム名	データ型	説明
node_id	int	PN ノード ID
type	int	ノードの種類
beacon_id	int[]	対応するビーコン ID

表 2 PN リンクテーブル

カラム名	データ型	説明
link_id	int	PN リンク ID
nd1	int	始点 PN ノード ID
nd2	int	終点 PN ノード ID
cost	double	実際のノード間の距離

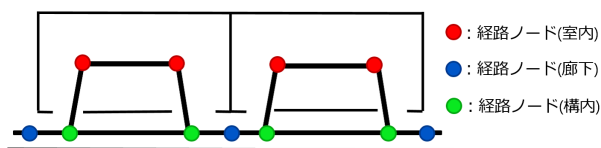


図 3 経路ネットワークの例

3.1.1 経路ネットワーク (PN)

経路ネットワークはユーザが実際に移動する経路をモデル化したネットワーク (グラフ) である。廊下や、部屋の出入り口の前、部屋の中など、経路・滞在場所として重要な地点にノードを配置することを想定する。経路ネットワークのノードは、設置場所によって種類分けされ、経路ノード (室内)、経路ノード (廊下)、経路ノード (構内) の 3 つがある。

経路ネットワーク上のノードを PN ノード、リンクを PN リンクとする。PN ノードのデータ構造を表 1 に、PN リンクのデータ構造を表 2 に示す。また、図 9 の教室の経路ネットワークの例を図 3 に示す。

3.1.2 ビーコンネットワーク (BN)

ビーコンネットワークはビーコン設置環境における実際のビーコンの配置関係をモデル化したネットワーク (グラフ) である。ビーコンネットワーク上のノードを BN ノード、リンクを BN リンクとする。ビーコンの設置地点に BN ノードを 1 対 1 で対応付けて配置する。ただし、ビーコンの設置地点だけでなく、部屋の出入り口や曲がり角など、経路ネットワーク上の PN ノードに対応する BN ノードを配置する。部屋の出入り口や曲がり角に配置した BN ノードを構内ノード、ビーコンの設置点に配置した BN ノードをビーコンノードとする。また、ビーコンの設置個所によって電波の反射特性が異なるため、ビーコンノードを室内ビーコンと廊下ビーコンに区別している。BN ノードと PN ノードは、ビーコン ID を介して対応関係を持つ。

BN ノードのデータ構造を表 3 に、BN リンクのデータ構造を表 4 に示す。BN ノードのノードの種類は、0:構内ノード、1:室内ビーコン、2:廊下ビーコンである。また、図 9 のビーコンネットワークの例を図 4 に示す。

表 3 BN ノードのデータ構造

変数名	データ型	説明
node_id	int	BN ノード ID
type	int	ノードの種類
beacon_id	int	対応するビーコン ID

表 4 BN リンクのデータ構造

変数名	データ型	説明
link_id	int	BN リンク ID
nd1	int	始点 BN ノード ID
nd2	int	終点 BN ノード ID
cost	double	実際のノード間の距離

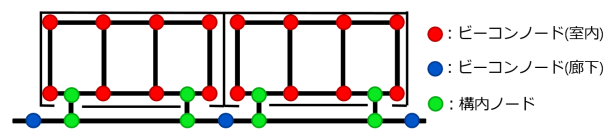


図 4 ビーコンネットワークの例

3.2 経路・滞在推定手法

次に、ビーコンネットワーク・経路ネットワークとビーコンログを用いた経路・滞在推定の手法を述べる。

3.2.1 ビーコンログ

本研究におけるビーコンログは、ビーコンメッセージを時系列順に記録したものと定義する。ビーコンメッセージとは、ビーコンを観測した時刻と、その時に認識した 0 個以上のビーコンデータ (ビーコン ID と RSSI) をもつ。ビーコンメッセージは、観測頻度 n 秒間隔で、スキャン時間 m 秒の間、ビーコンの取得を繰り返している。なお、ビーコン ID は MajorID とし、RSSI とはビーコンが発した電波強度を数値で表したものである。

3.2.2 ビーコンメッセージの統合・フィルタリング

課題 2 で述べた RSSI が不安定になりやすい性質を解決するために、ビーコンメッセージを、一定個数毎に、統合とフィルタリングを行なう。

はじめに、ビーコンメッセージの統合の手順を以下に示す。

- (1) ビーコンログを時系列順にビーコンメッセージ i 個ずつに分割する。
- (2) 分割したビーコンメッセージ群を 1 つのビーコンメッセージとして統合する。ただし、同じビーコン ID を持つビーコンデータが複数存在する場合は RSSI が最も高いものを採用する。また、時刻はビーコンメッセージ群の中で最も新しい時刻を割り当てる。

次に、ビーコンメッセージのフィルタリングについて説明する。フィルタリングは統合後のビーコンメッセージに対して、しきい値以下のビーコンデータを除去することで実現する。ただし、しきい値は室内ノードと廊下ノードで異なる値として定義することが可能である。

表 5 候補点のデータ構造

データ	説明
BN ノード ID	ビーコンネットワークのノード ID
ビーコン ID	ビーコンを識別する ID
RSSI	観測した受信信号強度
時刻	観測した時刻

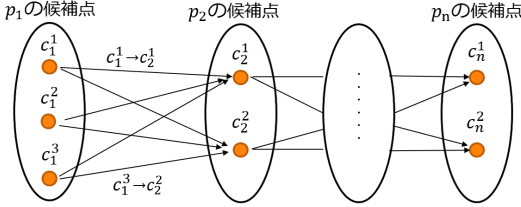


図 5 The candidate graph $G'_T(V'_T, E'_T)[2]$

3.2.3 候補点群系列の生成

統合・フィルタリングを行なったビーコンログを BST-Matching の入力データに変換する。BST-Matching では、ビーコンネットワーク上の BN ノードを候補点として経路推定を行うため、表 5 に示す、候補点群系列に変換する必要がある。具体的には、ビーコンメッセージに対して、以下の処理を行う。

- (1) ビーコンメッセージの RSSI が高い上位 k 個のビーコンデータ（ビーコン ID, RSSI）を時刻 t における候補ビーコンとする。
- (2) 候補ビーコンに対応する BN ノードの ID を、表 3 から取得する。
- (3) (1) と (2) で求めた BN ノード ID, ビーコン ID, RSSI, 時刻 t を持つ候補点を k 個生成する。候補点の構造を表 5 に示す。

これにより、各時刻毎に、最大 k 個の候補点群を生成することができ、その系列が候補点群系列となる。

3.2.4 ST-Matching による経路の生成

はじめに、ST-Matching のアルゴリズムの概要を述べる。

ST-Matching では道路ネットワーク $G = (V, E)$ と GPS データ（緯度経度）の系列 p_1, \dots, p_n を入力とする。各時刻 i において、GPS データの緯度経度から半径 r メートルの範囲にある道路ネットワーク上の頂点（候補点） c_i^t の集合を取得する。これを全ての入力時刻に対して行ない、図 5 に示す、候補グラフ G'_T を構築する。候補グラフの各辺に対して、評価式 $F(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ を計算する。そして、評価式が最小となる経路をピタゴラス法によって決定する。

ただし、評価式 $F(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ は以下の式によって定義される。

$$F(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) = F_s(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) * F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) \quad (1)$$

$$F_s(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) = N(c_i^s) * V(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) \quad (2)$$

ここで、 $F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s), N(c_i^s), V(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ は以下の値を示す。

- (1) $N(c_i^s)$ は、候補点と観測地点間の距離の近さを示す。ユーザと道路ネットワークとの近さをスコアリングしている。
- (2) $V(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ は、候補点間の経路の距離が観測地点間のユークリッド距離にどれだけ近いを示す。ユーザは回り道をしないという仮定の基で行なっている。
- (3) $F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ は、候補点間の移動速度が経路に合う速度を再現しているかを示す。

3.2.5 BST-Matching による経路の生成

ST-Matching は GPS と道路ネットワークを対象にしたアルゴリズムであったが、提案手法である BST-Matching は以下のように改良する。

- (1) ST-Matching の候補点群は GPS データの緯度経度の半径 r に含まれる道路ネットワークの頂点群としたが、BST-Matching では、RSSI がしきい値以上のビーコンに対応する BN ノードを候補点群とする。
- (2) ST-Matching の評価式 F はそのままではビーコンに適用できないので、後述するように再定義する。

スコア $N(c_i^s)$ は RSSI とビーコンとの距離の関係モデルを基に以下のように定義する。分母の式が RSSI とビーコンとの距離の関係モデルである。

$$N(c_i^s) = \frac{1}{10^{\frac{1}{20}(RSSI_{max} - RSSI)}} \quad (3)$$

ただし、 $RSSI_{max}$ はビーコンの設置個所によって異なり、本研究では、室内ビーコンは-55、廊下ビーコンは-60として設定した。

次に、 $F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ について、以下のように定義する。ただし、スコア $F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ は平均歩行速度 v_a を設定し、候補点間の速度 $v = \frac{dist}{t}$ と比較を行うことで、歩行速度として不自然な移動の検出を行なう。

$$F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) = \begin{cases} 1 & (v \leq v_a) \\ \frac{v_a \times t}{dist} & (v > v_a) \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $dist$ はビーコンネットワーク上の 2 点間の距離、 t は経過時間である。また、 v_a は本研究では 2.0m/s として設定した。またスコアの範囲は $0 < F_t(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) \leq 1$ であり、平均歩行速度よりも速くなればなるほど、スコアは 0 に近づく。

最後に、 $V(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s)$ を定義する。この関数は、候補点間の距離と観測地点間のユークリッド距離の割合を示す関

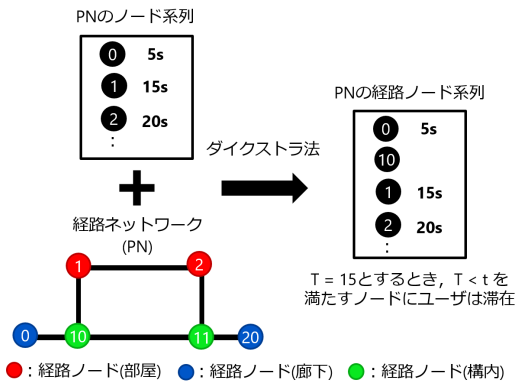


図 6 経路の補完による経路の決定と滞在推定

数である。しかしながら、ビーコンの場合、観測地点を決定することが難しいため、以下のように定義した。

$$V(c_{i-1}^t \rightarrow c_i^s) = 1 \quad (5)$$

これらの評価式を用いて、前節の関数 F を計算し、ビタビアルゴリズムを用いて、ビーコンネットワーク上の経路を推定することが可能になる。

3.2.6 経路ネットワークへの変換

BST-Matching によってビーコンログからビーコンネットワーク上の経路が生成される。しかし、ビーコンネットワークはビーコンの配置関係をモデル化したものであり、ユーザの歩行経路である経路ネットワークではない。そこで、ビーコンネットワークと経路ネットワークの対応関係から経路ネットワークへ変換する。ただし、変換後の経路ネットワークのノード系列は、必ずしも経路上のノードを網羅しているとは限らない。そこで、変換後の経路ネットワークのノード系列に対して、連続する2つのノード間をダイクストラ法によって結ぶことにより経路の補完を行なう。

また、滞在推定については各ノードが保持する統合したノードの個数とスキャン間隔の積から滞在時間 t を計算し、滞在判定時間 T と比較を行なうことで滞在推定する。以下の図 6 が経路の補完と滞在推定の例である。この例では、 $T=15$ のため、ユーザはノード 2 に滞在していたと推定される。

4. プロトタイプシステム

本研究では、提案手法だけでなく、ビーコンログを収集するスマートフォンのアプリ、ネットワーク構築システム、経路・滞在推定結果可視化システムを実装した。

4.1 ネットワーク構築システム

ネットワーク構築システムでは、図 7 に示すように、経路ネットワークとビーコンネットワークの構築が可能である。マップ上をクリックすることで PN ノードや BN ノー

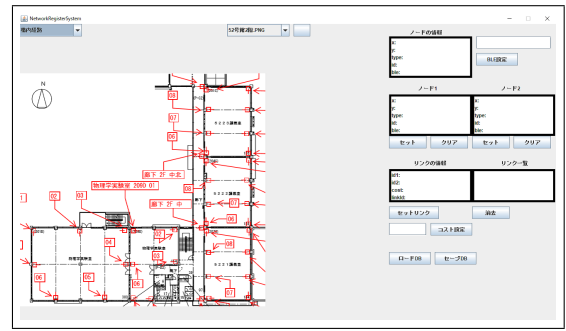


図 7 ネットワーク構築システムの画面例

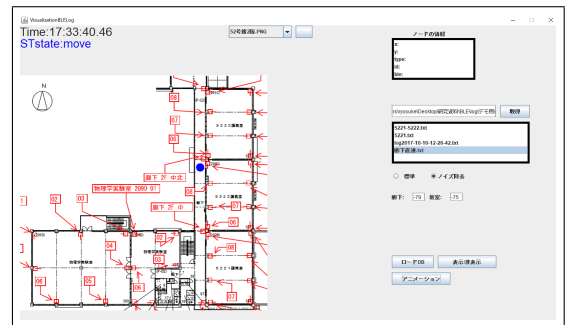


図 8 アニメーション例. ユーザが移動中であることが示されている

ドの追加が可能であり、画面右上の入力フォームで、ノードとビーコン ID を対応付けることが可能である。また、ノードを 2 つ選択することで、PN リンクと BN リンクの設定が可能である。また、ノードの種類やリンクのコストを設定することが可能である。

4.2 経路・滞在推定結果可視化システム

ネットワーク構築システムと同様なインタフェースで、図 8 に示すように、経路・滞在推定結果を可視化することができる。ノイズ除去の有無やしきい値を設定後にアニメーションボタンを押すことで経路・滞在推定を行ない、その結果としてマップ上に推定結果がアニメーション形式で表示される。

5. 実験と考察

実験の目的は、提案手法が経路推定及び滞在推定において、従来手法と比べて高精度に推定を行なえるか評価することである。ただし、従来手法に適切な比較手法が無かったため、後述する逐次的マップマッチングを比較対象とした。また、プロトタイプシステムが推定した経路・滞在推定結果を確認し、実際の経路との比較を行う。

5.1 逐次的マップマッチング

提案手法に対する比較対象として逐次的マップマッチングによる経路推定法を提案する。BST-Matching では、時刻 t における候補点を最大 k 個取得した。逐次的マップマッチングでは時刻 t における候補点の数を 1 とし、RSSI が最大のビーコンのみを候補点とした。これにより、ビー

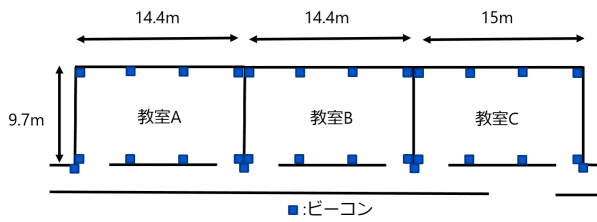


図 9 ビーコン設置環境例

場所	ビーコン設置個数
52号館 2階	38
52号館 3階	28
53号館 2階	40

コンネットワーク上の RSSI が最大となるビーコンを逐次的に結んだ系列が推定経路となる。ビーコンネットワークから経路ネットワークへの変換やフィルタリングなど、それ以外の条件は BST-Matching と同様である。

5.2 実験方法

5.3 実験環境

本研究では名古屋工業大学で運用されている打刻システム「Nitech ビロリン」のために設置されているビーコン [6] を利用して評価実験を行なう。全教室をはじめ学内のあらゆる場所にビーコン発信機を約 1600 台設置した。また、ビーコンの送信間隔は 760ms である。図 9 はある建物のあるフロアに設置されているビーコン設置図の例である。教室には通信安定性や耐故障性のために 4~6 個のビーコンを設置しており、また、廊下にも教室間隔ごとに設置されている。教室は通信安定性や冗長性のために全ての教室に複数個設置しているが、廊下は設置個数が少なく、また、全ての場所を網羅できているわけではない。

ただし、本実験では、名古屋工業大学にある 52 号館 2 階、3 階および 53 号館 2 階を対象に行なった。実験中は教室には誰も人がいない状況で行ない、廊下を歩行時にも人がいない状況で行なった。事前に実験環境に設置されているビーコンや経路を基にネットワークの構築を行ない、そのネットワークを用いて経路・滞在推定を行なった。対象とした環境のビーコンの個数は表 6 に示す。

5.3.1 実験手法

ビーコンログ収集アプリケーションを手に持ちスキャンを実行した状態で指定のルート歩行によって移動し、所定の地点で指定した秒数留まり、また移動する。今回 3 つのルートを指定し、それぞれ 10 個のビーコンログを収集した。それぞれのルートについては以下の図 10、図 11、図 12 である。

収集したビーコンログをプロトタイプシステムに読み込ませることで経路・滞在推定を行ない、推定経路を出力す

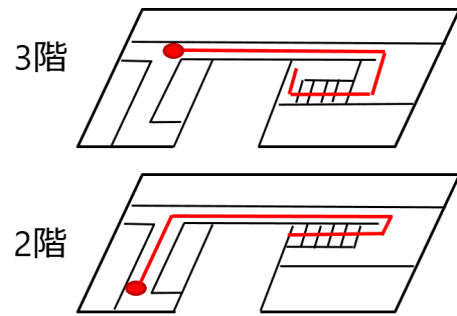


図 10 ルート 1

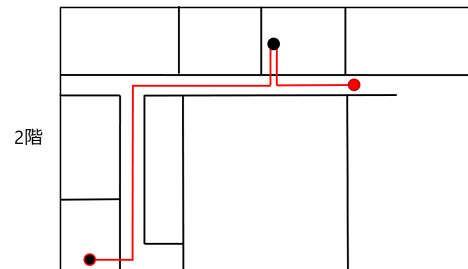


図 11 ルート 2. 黒丸の地点で停止

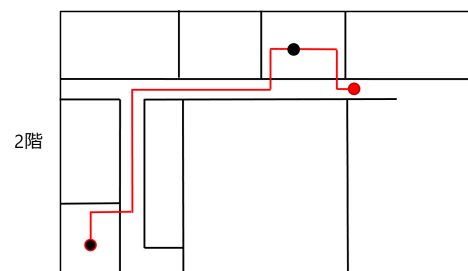


図 12 ルート 3. 黒丸の地点で停止

表 7 しきい値が異なる設定

	廊下	室内
1	-83	-81
2	-81	-78
3	-79	-75
4	-77	-72
5	-75	-69
6	-73	-66
7	-71	-63
8	-69	-60
9	-67	-57

る。推定経路と実際の経路を後述する評価尺度によって比較する。

5.3.2 実験項目

実験項目を以下に示す。

実験 1 経路推定に関する実験。経路推定におけるしきい値を表 7 のように変化させ、その推移を評価する。

実験 2 滞在時間の推定に関する実験。ルート 2、3 において、教室を移動した際に教室に入った時刻、中央を通過した時刻、教室から出た時刻を記録し、対応する地点のノードの推定時間と実際の時間を比較する。

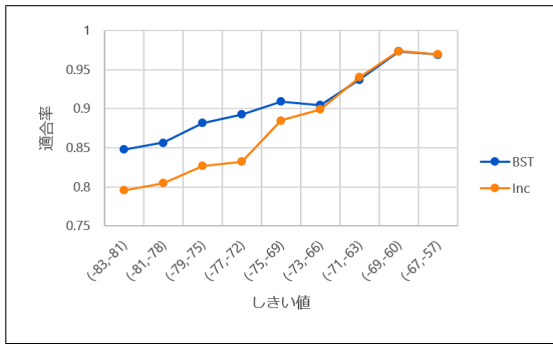


図 13 実験 1 の経路推定適合率

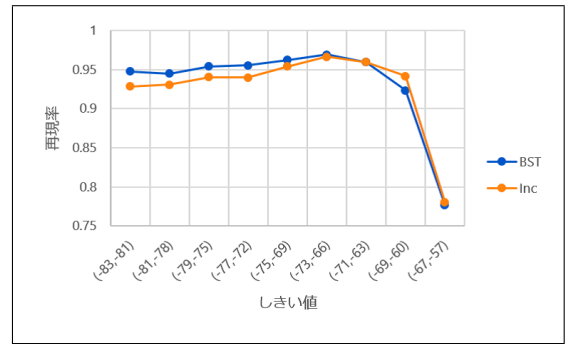


図 14 実験 1 の経路推定再現率

なお、実験 2 では、しきい値の設定の仕方によって、実験結果が大きく変わることが予想されるため、以下の 4 つのパターンを用意した。

BST 低 BST-Matching(提案手法, しきい値: 低)

BST 高 BST-Matching(提案手法, しきい値: 高)

Inc 低 逐次的マップマッチング(しきい値: 低)

Inc 高 逐次的マップマッチング(しきい値: 高)

ただし、しきい値: 低の場合は(廊下, 室内)=(-79,-75), しきい値: 高の場合は, (廊下, 室内)=(-71,-63)とした。

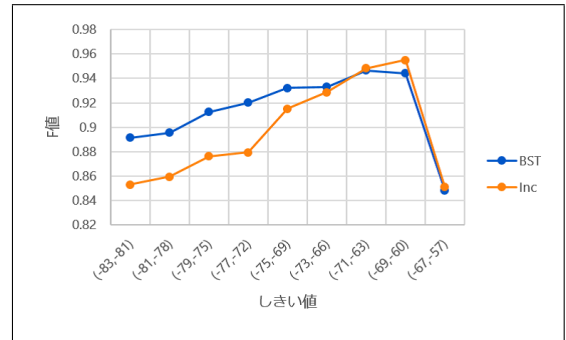


図 15 実験 1 の経路推定 F 値

5.4 実験結果と考察

はじめに、実験 1 の結果を示す。しきい値を表 7 のように変化させたときの、全ルートにおける経路推定の結果の平均を、図 13, 図 14, 図 15 に示す。

図 13 より、逐次的マップマッチングと BST-Matching の両方とも、しきい値を大きくすると適合率が向上することが分かる。RSSI 値が低いビーコンは位置推定の精度(特に適合率)に悪影響を与えやすいことを示唆する。その一方で、図 14 より、しきい値を大きくし過ぎると、極端に再現率が低下した。図 16, 図 17 に示すように、しきい値を上げるとノード数が低下していくことが原因であると考えられる。これらにより、図 15 に示すように、F 値は、しきい値(-73,-66)をピークとしたグラフとなった。しきい値が大きいくほど良い推定精度になる傾向があるが、その一方で、しきい値を大きくしすぎると極端に精度が悪化する。

逐次的マップマッチングと BST-Matching を比較すると、図 15 に示すように、最適なしきい値においては、両者の精度に大きな差はなかったが、しきい値が低い領域では BST-Matching の精度(F 値)の方が良い結果となった。BST-Matching は逐次的マップマッチングに比べて、しきい値に鈍感であることが分かった。表 8 に示すように、BST-Matching の F 値は最大 0.9466 ととても良いだけでなく、F 値のレンジ(0.055)は逐次的マップマッチング(0.095)に比べて 42%良好であった。一般に、ビーコンの RSSI の電波強度は、電池の電圧や人ごみなどで変化しやすく実環境では最適なしきい値を設定することは困難であるため、しきい値に鈍感である方が望ましい。

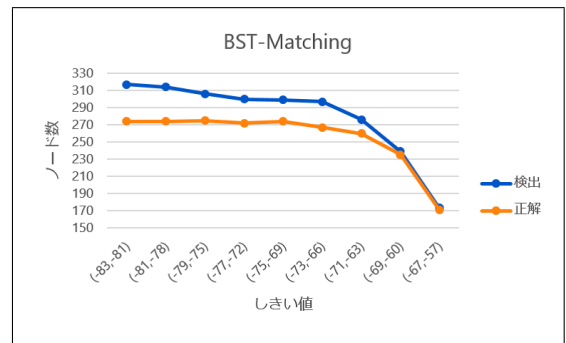


図 16 実験 1 の各ノード数の合計 (BST-Matching)

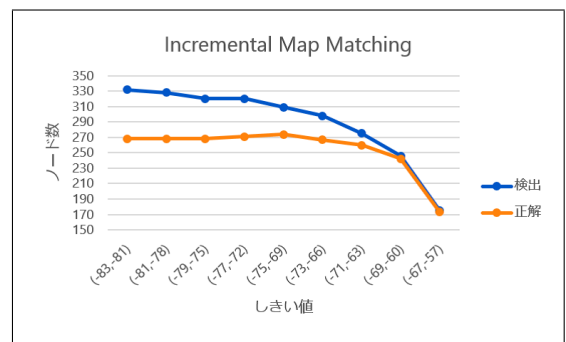


図 17 実験 1 の各ノード数の合計 (逐次的マップマッチング)

また、各手法の平均処理時間を表 5.4 に示す。逐次的マップマッチングは処理時間は早い一方で、BST-Matching は候補点間のスコアを全通り計算するため時間がかかる。特に、しきい値が小さい場合は、候補点数が増える傾向があり、より処理時間がかかる。

次に、実験 2 の滞在時間の推定結果を、表 10, 表 11 に示

表 8 実験 1 の結果のレンジ

	BST-Matching			逐次的マップマッチング		
	p_v	r_v	F_v	p_v	r_v	F_v
最大値	0.9373	0.9692	0.9466	0.9406	0.9665	0.9484
最小値	0.8480	0.9448	0.8914	0.7958	0.9287	0.8530
レンジ	0.0893	0.0243	0.0552	0.1449	0.0378	0.0953

表 9 処理時間の結果

	BST 低	Inc 低	BST 高	Inc 高
ルート 1	5192.3ms	21.6ms	1384.7ms	74.6ms
ルート 2	8429.4ms	20.9ms	2102.5ms	105.6ms
ルート 3	9777.6ms	19.8ms	2554ms	103.6ms

表 10 実験 2 のルート 2 の結果

手法	絶対誤差 (s)	標準偏差	正答率
BST 低	4.5170	2.0400	1.000
Inc 低	6.3810	2.6668	1.000
BST 高	8.7250	5.2690	0.950
Inc 高	8.4250	5.5656	0.950

表 11 実験 2 のルート 3 の結果

手法	絶対誤差 (s)	標準偏差	正答率
BST 低	15.679	9.0095	0.950
Inc 低	21.239	9.7209	0.925
BST 高	27.317	12.622	0.825
Inc 高	26.925	11.448	0.825

す。どちらの手法においても、しきい値が低い方が、誤差が少ない結果となった。しきい値が低い方が感度よくビーコンを検知できるため、滞在時間をより正確に判定できた。しきい値が低いとき、BST-Matchingの方が逐次的マップマッチングよりも最大 29% 良い結果となった。これらの結果により、滞在推定の精度は BST 低の手法が一番良いことが分かった。

6. おわりに

本研究では、GPS におけるグローバルマップマッチングの手法を参考に、ビーコン向けに改良した BST-Matching を提案した。提案手法では、ビーコンの配置関係をモデル化したビーコンネットワークと、ユーザの移動経路をモデル化した経路ネットワークの 2 つを用いて経路推定を行う。評価実験により、提案手法は、経路推定の精度を示す F 値は最大で 0.9466 と良好な結果を示すだけでなく、しきい値による影響の受けにくさを示す指標である F 値のレンジが 0.0552 と逐次的マップマッチングと比較して 42% 良好であった。また、滞在推定の絶対誤差も、提案手法の方が 29% 良好であった。

一方で、処理時間は提案手法は逐次的マップマッチングに比べて最大 493 倍遅くなるため、用途に応じて提案手法を使い分けるとよいだろう。

今後の課題として、提案手法はしきい値によるフィルタリングを行っていたが、設置場所に応じて動的にしきい値を変化させることができれば、さらなる精度向上が期待できるだろう。また、提案手法はしきい値に対して比較的鈍感であったため、ビーコン設置環境におけるビーコンの故障や人の存在の有無による影響に強いことが予想される。実際に様々な環境で実験を行うことによって、評価する必要がある。

謝辞 本研究の一部は JSPS 科研費 26330136, 25700009, および、総務省 SCOPE の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Sotiris Brakatsoulas, Dieter Pfoser, Randall Salas, Carola Wenk "On map-matching vehicle tracking data" Proceedings of VLDB' 05, pp.853-864, 2005.
- [2] Yin Lou, Chengyang Zhang, Yu Zheng, Xing Xie, Wei Wang, Yan Huang "Map-matching for low-sampling-rate GPS trajectories", Proceedings of SIGSPATIAL GIS2009, pp.352-361, 2009.
- [3] Christopher E. White, David Bernstein, Alain L. Kornhauser "Some map matching algorithms for personal navigation assistants", Transportation Research C, Vol. 8, pp. 91-108, 2000.
- [4] 木村 峻介, 松本 卓人, 浜中 雅俊, 李 昇姫, 迷子探しを目的とした屋内位置情報サービスの構築, 情報科学技術フォーラム講演論文集, Vol.12, No.4, pp.177-183. 2013.
- [5] 伊藤 誠吾, 河口 信夫, アクセスポイントの選択を考慮したベイズ推定による無線 LAN ハイブリッド位置推定手法と応用, 電気学会論文誌 C, Vol.126, No.10, pp.1212-1220, 2009.
- [6] 梶岡 慎輔, 山本 大介, 打矢 隆弘, 齋藤 彰一, 松尾 啓志, 内匠 逸, BLE ビーコンを用いた位置推定による打刻システムの運用と課題, 研究報告セキュリティ心理学とトラスト (SPT), 2016-SPT-20, No12, pp.1 - 7, 2016.
- [7] 酒井 瑞樹, 森田 裕之, Bluetooth を用いた屋内位置推定手法の提案, 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集, pp.53-56, 2016.
- [8] Shinsuke Kajioka, Tomoya Mori, Takahiro Uchiya, Ichi Takumi, Hiroshi Matsuo, "Experiment of indoor position presumption based on rssi of bluetooth le beacon," in Consumer Electronics (GCCE), 2014 IEEE 3rd Global Conference on. IEEE, pp. 337339, 2014.
- [9] 岡田一晃, 飯田啓量, Chenyi Liao, 今井瞳, 浦野健太, 牧与史, 角倉慎弥, 三橋諒也, 野惇登, 廣井慧, 梶克彦, 河口信夫, BLE を用いた IPSJ79 スタンプラリーの開発と行動分析, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2017) シンポジウム, pp. 1178-1187, 2017.
- [10] 駒井 清顕, 藤本 まなと, 荒川 豊, 諏訪 博彦, 安本 慶一, 複数人の行動・移動状況の把握を目標とした iBeacon による存在領域判定システムの検討, マルチメディア通信と分散処理ワークショップ 2015 論文集, Vol.2015, No.5, pp.71-77, 2015.